

고생대말-신생대초 기간에 일어난 한반도의 주기적 화성활동

박계현\*

부경대학교 환경해양대학 지구환경과학과

Cyclic Igneous Activities During the Late Paleozoic to Early Cenozoic Period Over the Korean Peninsula

Kye-Hun Park\*

Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**요 약:** 고생대말부터 신생대초에 이르는 기간 동안에 한반도에는 3 차례의 화성활동주기가 있었다. 이는 각각 페름기-트라이아스기, 쥐라기, 그리고 백악기-고제3기의 주기이다. 각각의 화성활동주기가 시작된 이후 점차 화성활동의 빈도가 높아지면서 정점에 도달하였다. 주목할만 것은 3차례의 주기 모두에서 화성활동이 종료되는 시기에 A-형의 화성활동이 보고되었다는 것이다. 또한 페름기-트라이아스기 및 백악기-고제3기 화성활동주기가 시작되던 시기에는 아다카이트질 화성활동이 있었다. 고생대말-신생대초 기간의 화성활동 대부분은 섭입대와 관련한 화성활동이었다. 따라서 각 화성활동주기가 시작되어 진행되다가 종료되는 변화는 한반도 주변의 판구조운동의 방향변화와 밀접한 관련있을 것으로 판단된다. 이러한 지구조환경의 변화에 대하여 다음과 같은 가설을 제시하였다. 페름기-트라이아스기 화성활동주기의 종료는 북중국과 남중국 사이의 대륙충돌의 영향으로 판구조운동의 방향이 급격하게 바뀐 탓으로 생각된다. 쥐라기 화성활동주기의 종료시에는 한반도 부근에서는 주목할만한 지구조환경의 변화가 알려져 있지 않으며, 아마도 곤드와나랜드의 분열 및 새로운 대양들의 생성 사건들중의 하나와 관련한 판구조운동방향의 급격한 변화와 관련있을 것으로 추론된다. 백악기말부터 제3기초까지 이어지던 활발한 화성활동의 종료는 인도대륙판이 아시아대륙판과 충돌한 것이 중요한 요인으로 판단된다. 페름기-트라이아스기 화성활동주기와 백악기-고제3기 화성활동주기가 시작할 무렵에 만들어진 아다카이트질 화성암은 섭입대 발달의 초기에 나타나는 섭입 해양슬랩의 용융과 관련있을 것으로 생각한다.

**핵심어:** 화강암, A-형 마그마, 아다카이트, 지구조환경

**Abstract:** There were three cycles of igneous activities from the late Paleozoic to early Cenozoic; Permian to Triassic, Jurassic, and Cretaceous to Paleogene. After the beginning of each igneous activity cycle, igneous activity became more frequent until its climax. It is noteworthy that A-type magmatisms are reported from near the ends of the all three igneous activity cycles. In addition, adakitic magmatisms occurred at the beginning of both the Permian-Triassic and the Cretaceous-Paleogene cycles. Most of the igneous activities during the late Paleozoic to early Cenozoic period were subduction-related. Therefore, transitions among beginning, proceeding, and closing of the igneous activity cycles would be intimately related with changes in directions of plate movements. In this context, I suggest following hypotheses. The closing of the Permian-Triassic igneous cycle was possibly a consequence of radical adjustment of plate motion occurred due to continental collision between north and south China blocks. Considering that no appreciable tectonic activities were recognized from the east Asian continent at the closing of the Jurassic igneous cycle, it seems that one of the strong events related with Gondwanaland-breakup and subsequent birth of the new oceans, which might cause sudden adjustments of plate motions. The closing of the Cretaceous-Paleogene igneous cycle seems to be caused as a consequence of the collision between India and Asia continents. Meanwhile, adakitic igneous bodies emplaced at the beginnings of the Permian-

\*Corresponding author

Tel: 051-629-6629

E-mail: khpark@pknu.ac.kr

Triassic and Cretaceous-Paleogene cycles could be products of slab-melting during the early stages of the subduction.

**Key words:** granite, A-type magma, adakite, tectonic environment

## 서 론

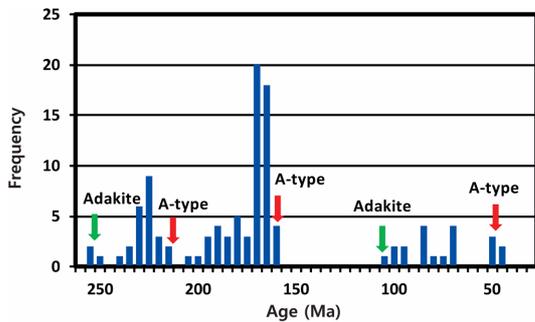
한국암석학회의 탄생 이래 20년의 세월이 흐르는 동안에 한반도지역의 지각 및 맨틀 진화와 관련한 연구에 많은 변화가 있어왔다. 한국암석학회가 태어나던 무렵은 이웃한 중국의 대륙충돌대의 존재가 알려지고, 이와 관련하여 충돌대의 연장이 한반도를 지나가는지, 지나가면 어디로 지나가는지에 대한 문제가 크게 주목을 받았던 시기이다. 이와 관련한 문제는 아직도 완전히 해결되지 못하고 논란이 지속되고 있다. 이러한 연구는 관련된 여러 분야의 연구를 더욱 활성화시키는 효과를 가져왔다. 특히 보다 정밀한 연대측정에 대한 관심이 증대하면서 한반도의 여러 구성암체들에 대한 지구연대학적 연구가 많이 수행되었다. 이러한 지구연대학적 연구는 한국기초과학지원연구원에서 오래전부터 운용중인 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer, TIMS)를 이용한 연대측정이 많은 도움을 주었고, 최근에 SHRIMP(Sensitive High Resolution Ion Micro Probe)가 도입됨으로써 더욱 활성화되었다. 한반도의 여러 구성암석들 중에서도 특히 현생 화성암체들에 대한 정밀한 연대측정이 매우 활발하게 진행되었다. 이렇게 정밀한 새로운 연대측정 자료들은 한반도의 지각 진화에 대한 전통적 견해에 상당한 수정이 필요함을 보여준다.

한반도에는 중생대로부터 신생대초까지 활발한 화성활동이 있었으며, 그 시기에 따라 크게 둘로 나누어 유라기의 대보화강암과 백악기-제3기의 불국사화강암으로 대표된다는 것이 전통적인 견해이다. 하지만 최근의 연구결과에 따르면 페름기말-트라이아스기 동안에 활동한 화성암도 상당수 보고되었을 뿐만 아니라(예, Sagong et al., 2005; Yi et al., 2012), 한반도 안에서의 지리적 위치에 따라서도 주된 화성활동의 시기에 변화가 있었음이 알려지고 있다(박계현 외, 2010). 또한 화성활동이 일어난 지구조환경 역시 태평양 쪽으로부터의 섭입작용의 직접적인 영향으로 만들어진 것뿐만 아니라 고생대말-중생대초에 있었던 것으로 추정되는 대륙충돌사건 이후의 후충돌 환경에

서 만들어진 것으로 주장되는 암체들도 있다(예, Cho et al., 2008; Peng et al., 2008; Seo et al., 2010). 이와 더불어 한반도에 인접한 북중국지괴의 경우에는 중생대의 화성활동 일부와 한반도의 유라기 화성활동이 불안정한 암권맨틀이 떨어져나감(detachment 또는 delamination)의 영향으로 만들어진 것이라는 주장이 나오고 있다(예, Yang and Li, 2008; Kee et al., 2010). 따라서 최근에 새롭게 밝혀진 여러 화성암들의 생성시기와 이들의 생성환경에 대한 주장들을 종합하여 한국의 현생 화성활동에 대한 보다 체계적인 정리가 필요하다고 판단된다. 한국암석학회 창립 20주년 기념 암석학회지 특집호에 함께 게재된 정창식과 김남훈(2012)에 페름기-고제3기의 여러 화성암체들에 대한 연대자료를 잘 정리되어있다. 이 논문에서는 이러한 한반도에서 일어났던 현생 화성활동의 연대분포가 몇 차례 반복적으로 나타나는 주기적 특징을 가짐과 동시에, 특이한 암석화학적 특징을 나타내는 A-형 화성암 및 아다카이트가 각각 이러한 화성활동 주기의 시작시점과 종료시점에 나타남에 주목할 필요가 있음을 강조하고자 한다. 특징적 지구조환경에서 만들어진다고 알려진 A-형 화성암 및 아다카이트와 같은 화성암의 출현은 한반도의 주기적 화성활동을 일으킨 지구조환경의 변화를 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 판단하며 이에 대하여 간략히 논의할 것이다. 이 논의는 이 문제에 대한 온전한 해답을 제시하고자 하는 것은 아니며, 한반도의 현생 화성활동에 대한 앞으로의 연구에서 참고할 필요가 있는 몇 가지 현상에 대해 주의를 환기시키고자 하는 것이다.

## 주기적 화성활동

앞에서 언급했던 것처럼 한국암석학회 창립 20주년 기념 특집호로 발간된 암석학회지 이번호에 게재된 정창식과 김남훈(2012)에는 남한 지역 현생 화강암류의 연대측정 결과를 정밀한 U-Pb 연대측정 결과를 위주로 정리하여 놓았으며, U-Pb 연대측정 결과가 상대적으로 적은 백악기-고제3기의 화성활동에는 Rb-Sr 연대측정 결과를 포함하여 정리하였다. Fig. 1에 도시



**Fig. 1.** U-Pb ages of the Korean granitoids emplaced during the period from the late Paleozoic to the early Cenozoic.

한 한반도의 고생대말-신생대초의 화성활동 연대분포는 정창식과 김남훈(2012)의 Table 1에 정리된 자료 중 U-Pb 연대측정 자료만을 선택하여 그린 것이다. 여기서는 화성활동의 연대분포적 특성에 대하여 논의하며, 연대자료에 대한 검토와 연령별 화성암체들의 지리적 분포 등에 대하여는 정창식과 김남훈(2012)을 참고하기 바란다. Fig. 1에 나타난 남한 지역의 고생대말-신생대초 화성활동 특징 중 가장 두드러진 것은 크게 3차례의 화성활동주기가 관찰된다는 것이다. 각 주기별로 간략하게 특징을 살펴보면 다음과 같다.

**페름기-트라이아스기 화성활동주기**

첫 번째의 화성활동주기인 페름기-트라이아스기 화성활동주기의 화성활동이 가장 먼저 시작된 것은 경상북도 북동부지역에 분포하는 장사리화강암으로 257.3±2.0 Ma, 그리고 함께 산출하는 반려암에서는 255.7±1.4 Ma의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 보고되었다(Yi et al., 2012). 이 암체의 바로 북쪽에 위치한 영덕화강암은 약간 젊은 252.9±2.5 Ma에서 246.7±2.1 Ma의 연령을 갖는 것으로 측정되었으며 아다카이트질의 지화학적 특징을 갖는다(Yi et al., 2012). 페름기-트라이아스기 화성활동주기의 화성활동은 경기육괴, 옥천변성대, 영남육괴에 걸쳐 모두 나타나며 약 230-225 Ma에 정점에 도달하였다. 약 220 Ma 경에는 옥천변성대와 영남육괴의 경계지역에 대강과 이안 알칼리화강암이 관입하였고(Cho et al., 2008), 이 시기로부터 약 20 Ma 동안은 화성활동이 거의 나타나지 않는다. 따라서 약 220 Ma를 페름기-트라이아스기 화성활동주기의 종료시점으로 볼 수 있다. 대강 및 이안 화강암은 A-형의 마그마특성을 가지며(김용

준 외, 1998; Cho et al., 2008), 이러한 특성은 화성활동주기의 종료와 밀접한 연관성을 관련되는 것으로 판단된다. 이에 대해서는 각 화성주기별 특성을 살펴본 뒤에 다시 논의한다.

**쥬라기 화성활동주기**

두 번째 화성활동주기는 트라이아스기-쥬라기 경계 시기인 약 200 Ma에 시작하여 중기쥬라기와 후기쥬라기의 경계시기인 약 160 Ma에 종료되었다. 이 주기의 화성활동은 지역적인 차이를 보인다. 전기쥬라기의 화성활동은 주로 영남육괴에서 나타나며, 중기쥬라기의 화성활동은 경기육괴와 옥천대에서 매우 활발하게 나타난다(박계현 외, 2010; 정창식과 김남훈, 2012). 쥬라기 화성활동주기의 정점시기는 약 175-165 Ma인 것으로 보인다. 쥬라기 화성활동주기가 종료된 시점은 165-160Ma로 나타나며, 이 시기에도 페름기-트라이아스기 화성활동주기 종료시와 마찬가지로 A-형 화성활동이 나타난다. Kwon and Cheong(1998)이 165.8±4.7 Ma의 Rb-Sr 전암연령을 보고한 관악산 화강암은 A-형 화강암의 특성을 나타내며(Kwon et al., 1995), 164.7±4.1 Ma의 SHRIMP U-Pb 연령이 보고된 부여의 알칼리장석화강암 역시 A-형 마그마의 특성을 보인다(Park et al., 2009).

**백악기-고제3기 화성활동주기**

Fig. 1을 보면 쥬라기의 화성활동이 종료된 이후 한반도에서는 화성활동의 휴지기가 오래 지속된 것으로 보인다. 하지만 백악기로부터 신생대초까지 한반도에서 지속된 화성활동에 대한 U-Pb 연대측정자료는 상대적으로 그 수가 많지 않으며, 비교적 최근에서야 보고되기 시작하였다(예, 김종선 외, 2008a,b; 황병훈 외, 2008; 황상구 외, 2011). 이처럼 제한된 수의 자료만으로는 이 시기 동안에 있었던 화성활동의 변화추이를 살펴보기가 어렵다. 그러나 지난 수십 년 동안의 연구에서 K-Ar 및 Rb-Sr 체계를 이용한 백악기-고제3기의 연대측정자료는 매우 많은 수가 보고되어 있다. 비록 K-Ar 및 Rb-Sr 체계를 이용한 연대측정자료들이 U-Pb 연대측정에 비해서는 정확도와 정밀도가 훨씬 떨어진다고 평가할 수 있으나 전체적인 동향을 살펴보는 데는 유용하다고 판단된다. Fig. 2에 여러 문헌에 발표된 백악기-신생대초의 한반도 화성활동에 대한 Rb-Sr 및 K-Ar 연대측정자료들을 도시하였다(김옥준, 1971; Jin et al., 1984; 윤현수,

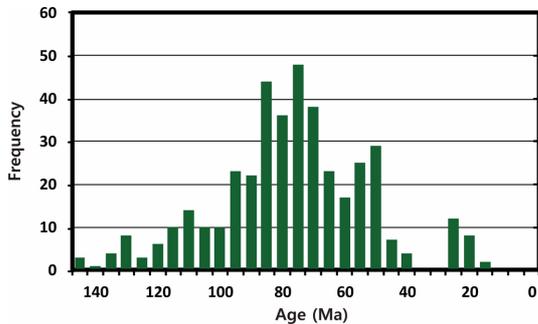


Fig. 2. K-Ar and Rb-Sr ages of the Cretaceous to Cenozoic igneous rocks of Korea.

1986; 박희인 외, 1988a,b; Reedman et al., 1989; 문희수 외, 1990; 진명식 외, 1991; 이문원 외, 1992; 이창신 외, 1992; 이현구 외, 1992; Kim and Nagao, 1992; 윤성효와 상기남, 1994; 김근수 외, 1995; Lee, J.I. et al., 1995, 1997; 좌용주와 박정미, 1996; 김진섭 외, 1997; Kim et al., 1997; 김규한 외, 1998; 김상중 외, 1999; 김용준 외, 2005; 정대교와 김경희, 1999; Sagong et al., 2001; 정대교, 2002; 박계현 외, 2003; 오창환 외, 2004; 김종선 외, 2005; 윤현수 외, 2006; 손문 외, 2007; 김정빈, 2008; Kim et al., 2008).

이 그림을 보면 한반도의 백악기-신생대초 화성활동은 백악기의 시작과 함께 개시되어 약 95 Ma 부근에 증가하기 시작하여 대략 85-65 Ma 사이에 최고조를 이루다가 점차 그 강도가 약해져서 약 50-45 Ma 경에 거의 종료된 것으로 보인다. 하지만 비교적 낮은 폐쇄온도를 나타내는 Rb-Sr 및 K-Ar 체계의 특성 탓에 원래의 화성활동 시기를 제대로 잘 나타내지 못할 가능성이 있다. 예를 들어 백악기초로 보고된 연령은 실제로는 쥬라기 또는 그 이전에 만들어진 암체들이 후기의 열적 교란에 의해 더 젊은 연령을 나타내게 된 것일 수 있다. 따라서 실제로 백악기 화성활동이 언제 시작되었는지, 이 주기의 화성활동이 언제 종료된 것인지에 대해서는 좀 더 심도있는 고찰이 필요하다. 하지만 이 주기 내에서 전체적인 화성활동의 빈도가 점차 증가하였고, 대략 80-65 Ma 부근에서 가장 활발한 활동을 보였으며, 이후 약 10 Ma 남짓 기간이 지난 뒤에 종료된 것으로 보는 것에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

백악기-신생대초에 있었던 화성활동 주기의 시작은 U-Pb 연대측정자료를 살펴보는 것이 더 정확한 판단

을 내릴 수 있을 것으로 생각된다. 비록 SHRIMP U-Pb 연대측정자료는 그 수는 많지 않지만 가장 오래된 연령은 일관되게 약 110 Ma 경을 나타낸다. 여기에는 황재하와 김유홍(2007)이 보고한 명성산 각섬석흑운모화강암(112±2 Ma), 황상구 외(2011)가 보고한 경기북부 철원분지의 유문암이 115.0±1.1 Ma, 화강반암이 111.24±0.85 Ma와 109.1±1.1 Ma이다. 북한의 여러 백악기 암체들에 대한 LA-ICPMS U-Pb 연대측정결과 역시 이와 같은 약 110 Ma의 연대를 보여준다(Wu et al., 2007). 아직은 백악기 화성암으로부터 110 Ma보다 더 오래된 U-Pb 연대측정 결과는 보고되지 않고 있다. 따라서 약 110 Ma의 시기가 남한은 물론 북한까지 포함하는 한반도 전역에 걸쳐 나타난 백악기 화성활동의 시작시기로 보는 것이 타당할 것으로 생각된다. 경상분지 하부의 전기백악기 쇄설성 퇴적암층들에서도 동시기의 연령을 나타내는 화성기원의 저어콘들이 발견되지만 더 오래된 백악기 연령을 보이는 저어콘은 거의 발견되지 않는 것(이태호 외, 2010)도 이러한 추론을 뒷받침한다. 경상분지 내의 심성암체들 중에서는 진동화강암과 마산 각섬석흑운모화강암이 각각 114.6±9.1 Ma(위수민 외, 2007)와 100.1±7.1 Ma(Lee, J.I. et al., 1995)의 Rb-Sr 전암연대를 갖는 것으로 보고되었으며 백악기-고제3기 화성활동주기의 초기산물일 가능성이 있다. 한편 좌용주 외(2004)는 LA-ICPMS 저어콘 U-Pb 연대측정을 통해 진동화강암의 연령을 80±2 Ma로 보고하였다. 위수민 외(2007)가 연대측정한 암체와 좌용주 외(2004)가 연대측정한 암체가 동일암체인지는 현재로는 확인할 수 없으나 필히 추후 연구를 통해 밝혀져야 할 것이다. 위수민 외(2007)는 진동화강암가 아타카이트질의 지구화학적 특성을 나타낸다고 하였으며 그 의미에 대해서는 뒤에 다시 논의한다.

백악기-고제3기 화성활동주기에서 본격적인 화성활동이 일어난 것은 훨씬 후인 것으로 생각된다. 그 이유는 약 110 Ma경의 규장질 화성암들이 한반도의 여러 곳에서 나타 이후에 화성활동이 그리 활발했던 것으로 보이지 않기 때문이다. 다시 화성활동이 재개된 것은 공주분지, 영동분지, 풍암분지 등 한반도의 여러 곳에 발달한 소규모의 백악기 소분지들 여러 곳에서 약 95 Ma 전후의 현무암질 내지 안산암질 화성활동이 있었으며(이문원 외, 1992; 정대교와 김경희, 1999; Sagong et al., 2001; 정대교, 2002), 거의 동시기인 94±4 Ma에 경상분지 내에서도 채약산 현무암이 생

성된 것으로 보고되어 있다(윤성효, 1998). 최근에 Lee et al.(2010)이 보고한 속리산 화강암의 Rb-Sr 연령( $94.8 \pm 3.6$  Ma) 역시 이와 비슷하며, 경상분지의 구산동 응회암의 LA-ICP-MS U-Pb 연대측정 결과가 약 97 Ma로 보고된 것을 감안하면(좌용주 외, 2004) 이 때부터 화성활동의 빈도가 더 높아진 것으로 생각된다. 이후 옥천대 중앙부의 무암사 화강암( $88.2 \pm 1.7$  Ma) 및 월악산 화강암( $89.6 \pm 2.2$  Ma)의 관입(Lee et al., 2010) 이후에 경상분지의 유천층군 퇴적지역과 남해안의 여러 지역에서 활발한 화성활동이 나타난 85-65 Ma의 백악기-고제3기 화성활동주기의 정점활동시기인 것으로 보인다. 정밀한 SHRIMP U-Pb 연대측정 자료가 더 많이 보고된다면 보다 정밀하게 화성활동의 추세변화를 알아보는 것이 가능해질 것이다.

백악기-신생대초 화성활동주기의 종료가 고제3기에 들어와서임은 Rb-Sr 및 K-Ar 연대 뿐만 아니라 SHRIMP U-Pb 연대로도 뒷받침된다. 예를 들어 윤성효 외(2011)는 경주-감포 일대의 고제3기분지내 화강암체들에 대하여 SHRIMP U-Pb 저어른 연대측정을 실시하였으며, 그 결과 오유리화강암은  $64.7 \pm 1.2$  Ma, 산서리화강암은  $63.7 \pm 0.8$  Ma, 그리고 호암리화강암은  $52.5 \pm 0.6$  Ma의 연령을 구하였다. 윤성효 외(2011)의 이러한 U-Pb 연대측정 결과가 기존의 Rb-Sr 결과와 상당한 연령의 차이가 있음을 보여주었으며, Rb-Sr 또는 K-Ar 자료만으로 시기를 논하는 것은 오류가능성이 높음을 말해준다. 황병훈 외(2008) 기계와 경주 지역에서 양산단층과 인접하여 분포하는 두 A-형 화강암들이 각각  $53.9 \pm 0.3$  Ma와  $53.6 \pm 0.7$  Ma의 SHRIMP U-Pb 연령을 갖는다고 보고하였다. 고제3기의 경주 남산 화강암이 A-형의 마그마 특성을 가짐은 여러 차례 보고된바 있다(Lee, M.J. et al., 1995; 고정선 외, 1996; Kim and Kim, 1997). 한편 김종선 외(2008b)는 경주지역의 남산화강암에서  $47.9 \pm 1.7$  Ma, 흑운모 화강암에서  $48.5 \pm 3.5$  Ma, 토함산 화강섬록암에서  $50.2$  Ma의 LA-ICP-MS U-Pb 저어른 연령을 얻었다. 윤성효 외(2011), 황병훈 외(2008) 및 김종선 외(2008b)의 자료는 모두 학술회의 발표자료이며, 암체의 구체적인 위치의 비교나 자료의 신뢰도를 검증할 수 있는 충분한 정보가 없기 때문에 서로 중첩된 암체인지 여부를 파악할 수 없다. 하지만 한반도의 백악기-고제3기 화성활동주기가 약 50 Ma 전후에 종료되었으며, 이 시기의 화성활동에 A-형 마그마가 나타났다는 것은 확실하다고 할 수 있다.

## 화성활동주기의 종합적 특성

이상에서 살펴본 결과와 같이 한반도에는 페름기-트라이아스 화성활동주기, 유라기 화성활동주기, 그리고 백악기-고제3기 화성활동주기의 세 차례 현생 화성활동주기가 나타났다. 각각의 화성활동 주기가 시작된 이후에는 공통적으로 화성활동이 점차 활발해지다가 정점시기가 도래한 이후 비교적 급속히 화성활동 주기가 종료되는 것으로 보인다. 또한 이러한 화성활동의 종류시점에서는 공통적으로 A-형의 화강암이 산출된다. 이와 같이 몇 차례에 걸친 화성활동 주기가 나타나는 것과, 각 주기 내에서의 화성활동 규모변화, 그리고 화성활동 주기의 종료시점에 A-형 화성활동이 나타나는 것은 섭입대 연변지역에서의 지구조적 환경변화와 이에 따른 화성활동 변화를 연관시켜 설명할 수 있는 중요한 단서를 제공해줄 수 있을 것으로 생각한다. 또한 페름기-트라이아스기 화성활동 주기의 시작시기와 백악기-고제3기 화성활동의 시작시기에 공통적으로 아다카이트질 화강암이 산출되는 것도 이러한 화성활동 주기가 시작된 지구조적 환경변화와 관련있을 것으로 생각한다.

Eby(1992)는 A-형 마그마를 다시 A1형과 A2형으로 구분하였다. A1형은 한반도에서는 계명산층의 변성화산암 및 알칼리화강암에서 나타나며(고상모 외, 2005; 박맹언 외, 2005) A1형은 열점, 플룸 또는 대륙의 열곡발달과 같은 비조산대의 지구조적 특성을 나타낸다(Eby, 1992). 한반도에서 고생대말-신생대초에 걸쳐 3차례 있었던 화성활동주기의 마지막에 나타난 A-형 화성활동은 Eby(1992)의 분류기준에 따르면 모두 A2형 영역에 도시된다. Eby(1992)에 따르면 A2형은 여러 종류의 지구조환경에서 나타날 수 있고, 후충돌환경과 비조산성 화성활동을 모두 포함할 수 있으며, 이러한 화학조성을 갖는 마그마는 섭입대를 통하여 만들어졌거나 대륙과 대륙의 충돌을 겪은 지각으로부터 생성되었음을 나타지만 화학조성만으로 지구조환경을 더 이상 구분하기는 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 각 화성활동주기의 최후기에 나타난 A2형 마그마 생성은 단순히 지구조판별도에 도시하여 그 환경을 추정해보는 것 보다는 전후의 한반도 지구조환경변화에 대한 보다 종합적인 인식을 바탕으로 해석하는 것이 바람직하다고 판단한다.

### A-형 화성활동과 화성활동주기의 종료

반복적으로 한반도 전역에 나타났던 고생대말-신생대초 기간에 걸친 세 차례의 화성활동 주기들이 모두 A-형 화성활동이 나타남과 함께 종료되었음을 앞에서 기술하였다. 이러한 A-형 화성활동들이 왜 각 화성활동주기의 마지막에 나타났고, 왜 A-형 화성활동이 나타남을 끝으로 화성활동 주기가 종료되었을까하는 의문이 생긴다. 우선 페름기-트라이아스기 화성활동주기의 종료시기에 정지한 A-형 대강 및 이안 알칼리 화강암의 기원은 그 이전에 정점 화성활동이 어떤 성격이었는지와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 약 225 Ma의 정치시기를 갖는 화강암질 심성암체는 옥천변성대의 청산, 백록, 점촌지역, 경기육괴 남서부의 남양, 북동부의 양양, 영남육괴의 상주, 함양 등과 같이 남한의 매우 넓은 지역에 걸쳐 관입하고 있음을 알 수 있다. 이들은 또한 대부분 화산호환경의 지구화학적 특징을 보인다. 따라서 이시기의 화강암들이 분포하는 지역은 대륙충돌이 일어나는 지역이 아니었을 것으로 생각된다. 또한 이 화강암체들은 아마도 당시 동아시아 대륙의 연변부를 따라 대륙쪽으로 섭입하는 섭입대의 영향으로 생성된 것으로 판단된다. 그렇다면 약 220 Ma 무렵에 A-형 알칼리 화강암이 생성되면서 페름기-트라이아스기의 화성활동주기가 종료된 것은 불과 약 5 Ma 동안에 지구조적 환경에 큰 변화가 일어났던 것으로 추정할 수 있으며, 이 시기에 주변지역에서 일어난 가장 현저한 사건은 바로 북중국과 남중국의 대륙충돌사건이다. 즉, 약 225 Ma 시기에 섭입대의 영향으로 화강암질 마그마가 생성되던 지구조적 환경이 북중국과 남중국 사이의 대륙충돌로 인하여 크게 교란받게 되었으며, 이로 인한 판구조 운동의 방향변화 및 섭입방향 변화 등이 일어났던 것으로 추정된다.

쥬라기 화성활동주기의 전기에는 영남육괴지역에 집중된 화강암질 화성활동이 일어났으나 후기에는 화성활동의 중심지역이 옥천대와 경기육괴지역으로 이동하였다(박계현 외, 2010). 쥬라기 화성활동주기에 생성된 화강암들은 대부분 섭입대와 관련된 지구화학적 특성을 나타낸다. 그러나 매우 활발한 정점 화성활동은 매우 급작스럽게 종료되었으며, 이 시기에 관악산과 부여 지역에 A-형의 지구화학적 특성을 나타내는 화강암체가 생성되었다. 이러한 급작스런 종료는 판구조 운동의 방향이 갑자기 바뀌게 만들 수 있는 강력한 충격적 사건이 필요하다고 생각한다. 그러나

한반도 및 주변지역에서는 약 165 Ma에 일어난 잘 알려진 주목할만한 지질학적 사건이 없다. 하지만 쥬라기에는 곤드와나 대륙이 아프리카, 남아메리카, 남극, 호주, 인도 등과 같은 여러 조각으로 갈라지기 시작하면서 그 사이에 대양이 만들어지고, 동시에 새로운 중앙해령의 생성과 새로운 방향으로의 판구조 운동이 일어나던 시기였다. 따라서 어떤 대륙의 분열과 이에 따른 판구조 운동의 방향변화가 결정적 영향을 주었을 가능성이 있다고 생각된다.

백악기-고제3기의 화성활동주기에 대해서는 정밀한 U-Pb 연대측정 자료가 상대적으로 적어 정점 활동시기의 규정과 정점활동기 이후 종료시점까지 지속적으로 화성활동이 이어졌는지 아니면 화성활동의 세기가 다소 감소하는 추세이었던지를 정확하게 알기는 어렵다. 하지만 Rb-Sr 및 K-Ar 연대측정 자료로 판단할 때 다소 세기가 줄어들기는 하였으나 비교적 활발했던 화성활동이 이어졌던 것으로 생각된다. 백악기-고제3기 화성활동주기 역시 대륙연변부를 따라 일어났던 섭입작용의 영향으로 화성활동이 일어났던 것으로 보인다. 백악기-고제3기 화성활동주기의 종료시점에도 경주 남산지역에서 A-형의 화성활동이 보고되었다. 따라서 이 시기 역시 섭입작용에 영향을 줄 수 있을 정도로 이때까지 오랫동안 지속되던 판구조 운동의 체계를 바꾸게 만들 수 있는 매우 현저한 지구조적 환경변화가 있었을 것으로 생각된다. 한반도의 주변부에서는 이러한 변화를 일으킬만한 사건이 보고되지 않았다. 하지만 이 시기에 일어난 전지구적인 변화를 일으킨 사건이 인도대륙이 유라시아대륙과 충돌한 것이다. 이 사건은 비교적 자세하게 연구되어 있으며 비교적 최근에 Leech et al.(2005)는 새로운 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 통해 인도의 초고압변성작용이  $53.3 \pm 0.7$  Ma에 일어났음을 밝혔다. 이들은 또한 인도판이 빠른 속도로 섭입한 것을 감안하여  $57 \pm 1$  Ma에는 인도대륙지각이 아시아대륙의 해령에 도달했을 것으로 추정하였다. 이와 같은 인도대륙과 아시아대륙의 충돌시기는 황병훈 외(2008)가 보고한 경주 및 기계지역 A-형 화강암들의 연령인  $53.9 \pm 0.3$  Ma 및  $53.6 \pm 0.7$  Ma와 아주 잘 일치한다. 즉, 인도대륙이 아시아대륙에 닿는 순간부터 그 영향이 주변으로 퍼져 나가기 시작하여 동쪽의 한국에서는 그 이전에 상당기간 지속되었던 백악기-고제3기의 화성활동주기가 큰 변화를 겪게 되었으며, 인도대륙이 초고압 깊이까지 도달한 순간쯤에 한국에서는 A-형 화성활동이 일어

나면서 백악기-고제3기의 화성활동주기가 종료된 것으로 생각된다.

#### 아다카이트질 화강암과 화성활동주기의 시작

이상에서 살펴본대로 한반도에는 몇 차례의 주기적인 현생 화성활동이 있었고, 각 주기는 A-형 화성활동이 나타난 후 종료되었다. 그러면 주기적 화성활동의 시작을 알리는 특징적 화성활동은 없는지 궁금해진다. 현재 모든 주기에 대해 공통적으로 발견된 특징적 화성활동 종류는 없지만 페름기-트라이아스기 화성활동주기의 시작시기와 백악기 화성활동주기의 시작시기에는 아다카이트질 마그마가 공통적으로 나타나는 것에 주목할 필요가 있다고 판단된다.

Yi et al.(2012)의 연대측정자료에 따르면 페름기-트라이아스기 화성활동주기는 경상북도 북동부 지역의 장사리 암체의 정치로부터 시작되었고, 이보다 약간 뒤에 관입한 영덕 암체가 관입하였다. Yi et al(2012)는 기발표 자료들을 재검토하여 영덕암체는 고실리카 함량을 갖는 아다카이트의 지구화학적 특징을 가짐을 밝혔다. Yi et al.(2012)는 또한 이러한 아다카이트가 만들어진 것은 페름기-트라이아스기 전환기 부근에 동아시아 대륙연변부를 따라 적어도 부분적으로는 뜨거운 섭입체계가 발달했음을 나타낸다고 하였다. 백악기-고제3기의 화성활동주기가 시작된 약 110 Ma의 시기에 생성되었을 가능성이 있는 경남지역의 진동화강암(114.6±9.1Ma)은 아다카이트질의 지화학적 특성을 나타낸다(위수민 외, 2007). 진동화강암의 경우 생성시기가 위수민 외(2007)의 보고처럼 약 110 Ma인지 아니면 좌용주 외(2004)의 보고처럼 약 80 Ma인지는 확인할 필요가 있다. 하지만 약 85-80Ma에 이르러서야 백악기의 화성활동이 활발해지기 시작했음은 확실한 것으로 판단된다. 따라서 진동화강암이 이 주기의 화성활동이 시작시점 또는 화성활동이 활발해지기 시작한 시점으로 볼 수 있다고 생각된다.

왜 페름기-트라이아스기 화성활동주기와 백악기-고제3기 화성활동주기의 시작 또는 활발한 화성활동이 시작되는 시점에 아다카이트질의 마그마가 발견되는 것인가? 아다카이트질 마그마는 섭입된 젊은 해양암권 맨틀의 용융에 의해서(Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999; Martin et al., 2005) 또는 낮은 각도로 섭입할 때 일어나는 슬랩용융으로 만들어질 수 있으며(Gutscher et al., 2000), 상당한 슬랩용융은 5 Ma 이하의 아주 젊은 해양암권이 섭입할 때만

일어날 수 있다는 주장이 제기되기도 하였다(Peacock et al., 1994). 이를 종합하면 아다카이트는 섭입하는 해양지각의 용융 또는 맨틀 썩기의 페리도타이트가 용융으로 만들어질 수 있으며, 비교적 젊은 해양암권의 섭입이 일어났을 가능성이 큰 것으로 보인다. 영덕암체나 진동암체 모두 상당히 낮은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초기시를 갖는 것도 결핍맨틀물질이 상당량 포함되어 있음을 나타내며, 이러한 슬랩용융을 지지하는 증거라고 할 수 있다. 각 화성활동 주기의 초기에 아다카이트질 마그마가 나타난 것은 섭입작용이 시작되는 시점에 아다카이트가 형성되었음을 나타낸다. 만약 이러한 섭입작용의 시작이 섭입대 부근에 새롭게 형성되었거나 이동해온 확장경계와 관련있을 가능성이 높다고 생각된다. 이러한 환경에서는 아다카이트를 생성할 수 있는 섭입하는 젊은 슬랩의 용융이 일어났을 가능성이 있다. 이러한 섭입작용이 지속적으로 진행되어 충분한 시간이 흐르면 일반적인 섭입관련 화강암질 마그마의 생성이 이루어질 것으로 생각된다. 그러나 섭입작용이 시작된 초기에는 아직 상부의 지각에 충분한 열이 전달되지 못하여 지각물질의 용융은 일어나기 어려울 것이다. 그러나 이러한 섭입작용이 시작된 초기시기에는 맨틀 내부로 섭입된 해양암 상부의 해양지각에 맨틀로부터 충분한 열을 받아 용융될 가능성이 높다고 판단된다. 따라서 섭입작용이 일어나는 초기시기에 가용한 마그마는 아다카이트질 마그마가 유일 또는 우세한 마그마 종류일 가능성이 있다고 판단된다.

## 결 론

비교적 최근에 보고된 정밀한 연대측정자료를 종합해보면 고생대말부터 신생대초에 이르는 기간 동안에 한반도에는 파동처럼 지년간 여러 차례의 화성활동주기가 있었음이 파악된다. 이 활동주기는 페름기-트라이아스기, 쥐라기, 그리고 백악기-고제3기의 세 차례의 화성활동주기로 나뉘어진다. 대부분의 화성활동이 섭입대와 관련한 화성활동이라고 판단되기 때문에 각 화성활동주기가 시작되어 진행되다가 종료되는 변화는 한반도 주변의 판구조운동의 방향변화와 관련있을 것으로 판단된다.

각각의 화성활동주기가 시작된 이후 점차 화성활동의 빈도가 높아지면서 정점에 도달된 이후 화성활동주기가 종료되는 시기에는 3차례의 주기 모두에서 A-

형의 화성활동이 보고되었다. 이외는 대조적으로 페름기-트라이아스기 및 백악기-고제3기 화성활동주기의 시작시기에는 아다카이트질 화성활동이 있었다. 이렇게 각 화성활동주기의 시작과 종료시기에 특징적인 화성활동이 나타난 것은 당시의 광역적 지구조환경변화를 지시해주는 단서로 생각된다. 어떠한 지구조환경변화가 결정적인 요인이었는지에 대하여 충분한 검증이 이루어진 것은 아니지만 다음과 같은 가설들을 검토해볼 필요가 있다고 판단된다.

페름기-트라이아스기 화성활동주기의 종료는 북중국과 남중국 사이의 대륙충돌의 영향으로 판구조운동의 방향이 급격하게 바뀐 탓으로 생각된다. 유라기 화성활동주기의 종료시에는 한반도 부근에서는 주목할만한 지구조환경의 변화가 알려져 있지 않으며, 아마도 곤드와나랜드의 분열 및 새로운 대양들의 생성 사건들중의 하나와 관련한 판구조운동방향의 급격한 변화와 관련있을 것으로 추론된다. 백악기말부터 제3기초까지 이어지던 활발한 화성활동의 종료는 인도대륙판이 아시아대륙판과 충돌한 것이 직접적인 요인으로 판단된다.

페름기-트라이아스기 화성활동주기와 백악기-고제3기 화성활동주기가 시작할 무렵에 만들어진 아다카이트질 화성암은 섭입대 발달의 초기에 나타나는 섭입해안슬랩의 용융과 관련있을 것으로 생각한다.

## 사 사

우리나라의 지질학 발전에 큰 기여를 해온 한국암석학회의 태동부터 함께 해온 것이 자랑스럽습니다. 또한 이렇게 20주년 기념 특집호에 참여할 수 있게 된 것을 영광이라고 생각합니다. 앞으로도 한국암석학회와 암석학회지의 무궁한 발전을 기원합니다. 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2008-0058809). 여러 가지로 결점이 많은 논문을 읽고 여러 가지 유익한 조언을 해주신 정창식 박사와 김종선 박사께 감사드립니다.

## 참고문헌

고상모, 김종환, 박계현, 2005, 옥천변성대 충주지역의 신원생대 A-형 화산활동. 암석학회지, 14, 157-168.  
고정선, 윤성효, 이상원, 1996, 경주 남산일대의 A-형 화강암의 암석학 및 지화학적 특성. 암석학회지, 5, 142-160.

김규한, Tsuyoshi Tanaka, Keisuke Nagao, 1998, 부평은 광산 지역의 유문암질암과 화강암류의 K-Ar연령과 Nd,Sr 동위원소. 자원환경지질, 31, 149-158.  
김근수, 김종열, 정규귀, 황진연, 이준동, 1995, 경상북도 경주-감포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr연대, 지구과학회지, 16, 272-279.  
김상중, 이현구, 이찬희, Tetsumaru Itaya, 1999, 북동부 경상분지의 화강암류에 대한 지구화학 및 K-Ar 연대. 자원환경지질, 32, 141-150.  
김옥준, 1971, 남한의 신기화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 4, 1-9.  
김용준, 조동룡, 이창신, 1998, 한반도 남서부 남원 일대에 분포하는 A형 대강 화강암의 암석학, 지화학 및 지구조적 의미. 자원환경지질, 31, 399-413.  
김용준, 이창신, 김희남, 황인호, 2005, 목포지역에 분포하는 백악기 화성암류의 암석화학과 지질시대. 지구과학회지, 20, 505-519.  
김정민, 2008, 시화호층 내 화산암류의 K-Ar 연대와 지질학적 의미. 지질학회지, 44, 399-408.  
김중선, 손문, 김진섭, 김정민, 2005, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 화산암류의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  연대. 암석학회지, 14, 93-107.  
김중선, 좌용주, Orihashi, Yuji, 2008a, LA-ICP-MS에 의한 경상분지 서부지역 화강암의 U-Pb 저어콘 연령. 한국암석학회한국광물학회 2008년 공동학술발표회 논문집, 21.  
김중선, 좌용주, Orihashi, Yuji, 2008b, LA-ICP-MS에 의한 경주지역 화강암류의 U-Pb 저어콘 연령. 한국암석학회한국광물학회 2008년 공동학술발표회 논문집, 119.  
김진섭, 박맹인, 성종규, 1997, 가거도(소흑산도)의 백악기 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 암석학회지, 6, 19-33.  
문희수, 김영희, 김종환, 유장한, 1990, 해남지역 화산암류와 납석 및 고령토 광상의 K-Ar연대, 광산지질, 23, 135-141.  
박계현, 김명정, 양윤석, 조경오, 2010, 한반도 유라기 심성암의 연령분포. 암석학회지, 19, 269-281.  
박계현, 백인성, 허민, 2003, 여주시 도서지역의 백악기층에 나타나는 화성활동 및 퇴적시기. 암석학회지, 12, 70-78.  
박맹인, 김근수, 박계현, 2005, 계명산층 내의 충주 철광상 주변에 분포하는 변성화산암의 성인. 암석학회지, 14, 169-179.  
박희인, 장호완, 진명식, 1988a, 한반도중부지역의 광상생성기와 생성구 -경기육괴내의 광상생성연령-. 광산지질, 21, 349-358.  
박희인, 장호완, 진명식, 1988b, 태백산지역내 광상의 생성연령. 광산지질, 21, 57-67.  
손문, 김중선, 황병훈, 이인현, 김정민, 송철우, 김인수, 2007, 거제도 동부에 분포하는 고제3기 암맥군: 절대연대와 지구조적 의미. 암석학회지, 16, 82-99.  
오창환, 김성원, 황상구, 손창환, 김창수, 김형식, 2004, 청송 주왕산 북부 일대의 구과상 유문암에 대한 연구. 암석학회지, 13, 103-118.

- 윤성효, 1998, 유천화산암 분포지 북부 백악기 채약산화산암의 암석화학 및 스트론튬 동위원소비 조성. 지질학회지, 34, 161-171.
- 윤성효, 상기남, 1994, 경상분지 남부의 백악기 화산암복합체의 콜드론구조 및 지질년대. 지구과학회지, 15, 376-391.
- 윤성효, 김동현, 김병훈, 김동현, 구태우, 2011, 갑포 일대 제3기분지내 화강암체의 SHRIMP U-Pb 저어론 연대. 대한자원환경지질학회 2011년 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집, 118.
- 윤현수, 1986, 함백분지 남부지역에 분포하는 백악기 화강질암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 19, 특별호, 175-191.
- 윤현수, 홍세선, 김정민, 2006, 경기북부 갈말-영북일대 백악기 홍색 각섬석흑운모화강암의 암석화학. 암석학회지, 15, 167-179.
- 위수민, 김윤지, 최선규, 박정우, 유인창, 2007, 진동화강암체의 아다카이틱한 특성. 자원환경지질, 40, 223-236.
- 이문원, 원종관, 김광호, 1992, 경기 육괴 내에서의 백악기 화산활동과 암석학적 연구 -갑천, 음성 및 공주 분지를 중심으로-. 지질학회지, 28, 314-333.
- 이창신, 김용준, 박천영, 이창주, 1992, 광양-승주지역에 분포하는 화강암류의 암석화학. 광산지질, 25, 51-60.
- 이태호, 박계현, 천종화, 이기욱, 2010, 경상분지 진주층 및 신라역암의 SHRIMP U-Pb 저어론 연령분포 및 그 의미. 암석학회지, 19, 89-101.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, Tetsumaru Itaya, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조 연구; 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25, 337-349.
- 정대교, 2002, 백악기 공주분지의 퇴적상 및 화산활동. 지질학회지, 38, 1-19.
- 정대교, 김경희, 1999, 백악기 풍암 퇴적분지의 생성 진화와 퇴적물 기원. 한국석유지질학회지, 7, 28-34.
- 정창식, 김남훈, 2012, 남한 지역 현생 화강암류의 연대측정 결과 정리. 암석학회지, 21, 173-192.
- 좌용주, 박정미, 1996, 경상분지 고성지역의 화성암류에 대한 암석학적 연구 1. 주성분원소 지구화학과 K-Ar 방사성 연대. 자원환경지질, 29, 561-573.
- 좌용주, 이용일, Yuji Orihashi., 2004, 구산동 응회암과 진동 화강암에서 산출되는 저콘에 대한 U-Pb 연대와 진동층 퇴적시기에 대한 고찰. 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, 73.
- 진명식, 이진수, 김성재, 1991, 한국서해대륙붕 제2광구의 해저심부에서 채취한 시추코아인 함자연동 현무암의 K-Ar전암석연령과 지구조적 의의. 지질학회지, 27, 212-221.
- 황병훈, W.G. Ernst, 손문, 이준동, 2008, 경상분지 양산단층 주변 화강암류의 SHRIMP-RG 연대와 지구조적 의의. 한국암석학회한국광물학회 2008년 공동학술발표회 논문집, 22.
- 황상구, 안유미, 이기욱, 2011, 철원분지 화성암류의 SHRIMP 연령측정과 화산작용 시기. 암석학회지, 20, 231-241.
- 황재하, 김유홍, 2007, 한국지질도(1:50,000), 지포리도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, 54p.
- Cho, D.-L., Lee, S.R. and Armstrong, R., 2008, Termination of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny in the Ogcheon belt, South Korea: occurrence of ca. 220 Ma post-orogenic alkali granites and their tectonic implications. Lithos, 105, 191-200.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347, 662-665.
- Eby, G.N., 1992, Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20, 641-644.
- Gutscher, M.-A., Maury, R., Eissen, J.-P. and Bourdon, E., 2000, Can slab melting be caused by flat subduction? Geology, 28, 535-538.
- Jin, M.-S., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F., 1984, Fission track dating of apatite from the Jurassic and Cretaceous granites in South Korea. The Journal of the Geological Society of Korea, 20, 257-265.
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Jeong, Y.-J. and Kwon, S., 2010, Characteristics of Jurassic continental arc magmatism in South Korea: tectonic implications. The Journal of Geology, 118, 305-323.
- Kim, C.-S. and Kim, G.-S., 1997, Petrogenesis of the early Tertiary A-type Namsan alkali granite in the Kyongsang Basin, Korea. Geoscience Journal, 1, 99-107.
- Kim, C.B., Kim, J. and Huh, M., 2008, Age and stratification of dinosaur eggs and clutches from Seonso Formation, South Korea. Journal of Korean Earth Science Society, 29, 386-395.
- Kim, I.J. and Nagao, K., 1992, K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea, 1, 58-70.
- Kim, S.J., Lee H.K. and Itaya, T., 1997, K-Ar ages and geochemistry for granitic and volcanic rocks in the Euseong and Shinryeong area, Korea. Economic and Environmental Geology, 30, 603-612.
- Kwon, S.-T. and Cheong, C.-S., 1998, Rb-Sr isotope study of the Kwanaksan stock in the Gyeonggi massif, Korea. 53th Annual Meeting of Geological Society of Korea, Abstract with Programs, 33-34.
- Kwon, S.-T., Shin, K.B., Park, H.K. and Mertzman, S.A., 1995, Geochemistry of the Kwanaksan alkali feldspar granite: A-type granite? The Journal of the Petrological Society of Korea, 4, 31-48.
- Lee, J.I., Lee, M.J., Doo, K.T., Lee, M.S. and Nagao, K., 1997, K-Ar age determination of the granitic plutons in Ulsan-Kyeongju area, the mid-eastern Kyeongsang Basin, Korea. Journal of Korean Earth Science Society, 18, 379-386.
- Lee, J.I., Kagami, H. and Nagao, K., 1995, Rb-Sr and K-Ar age determinations of the granitic rocks in the southern

- part of the Kyeongsang basin, Korea: implication for cooling history and evolution of granitic magmatism during late Cretaceous. *Geochemical Journal*, 29, 363-376.
- Lee, M.J., Lee, J.I. and Lee, M.S., 1995, Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkali granite in the Kyeongju area, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 583-607.
- Lee, S.-G., Shin, S.-C., Kim, K.-H., Lee, T., Koh, H. and Song, Y.-S., 2010, Petrogenesis of three Cretaceous granites in the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea: Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic constraints. *Gondwana Research*, 17, 87-101.
- Leech, M.L., Singh, S., Jain, A.K., Klempner, S.L. and Manickavasagam, R.M., 2005, The onset of India-Asia continental collision: early, steep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 234, 83-97.
- Martin, H., 1999, Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46, 411-429.
- Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J.-F. and Champione, D., 2005, An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79, 1-24.
- Park, Y.S., Kim, S.W., Kee, W.-S., Jeong, Y.-J., Yi, K. and Kim, J., 2009, Middle Jurassic tectono-magmatic evolution in the southwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Geosciences Journal*, 13, 217-231.
- Peacock, S.M., Rushmer, T. and Thompson, A.B., 1994, Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121, 227-244.
- Peng, P., Zhai, M., Guo, J., Zhang, H. and Zhang, Y., 2008, Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: an example from North Korea. *Geological Magazine*, 145, 637-647.
- Reedman, A.J., Park, K.-H. and Evans, J.A., 1989, The age of granitoid intrusions and related mineralization in the Chisulryoung Mountain area, south-east Korea: constraints on the age of the Chisulryoung Volcanic Formation and Yucheon Group volcanism. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 51-58.
- Sagong, H., Kwon, S.-T., Cheong, C.-S. and Choi, S.H., 2001, Geochemical and isotopic studies of the Cretaceous igneous rocks in the Yeongdong Basin, Korea: implications for the origin of magmatism in pull-apart basin. *Geosciences Journal*, 5, 191-201.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, TC5002, doi:10.1029/2004TC001720.
- Seo, J., Choi, S.-G. and Oh, C.W., 2010, Petrology, geochemistry, and geochronology of the post-collisional Triassic magmerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18, 479-496.
- Wu, F.-Y., Han, R.-H., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Zhai, M.-G. and Park, S.-C., 2007, Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238, 232-248.
- Yang, W. and Li, S., 2008, Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning: implications for lithospheric thinning of the North China Craton. *Lithos*, 102, 88-117.
- Yi, K., Cheong, C.-S., Kim, J., Kim, N., Jeong, Y.-J. and Cho, M., 2012, Late Paleozoic to Early Mesozoic arc-related magmatism in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2012.02.007.

---

2012년 4월 16일 접수

2012년 4월 17일 심사개시

2012년 4월 22일 채택